

유해대기오염물질 모니터링을 위한 우선순위 산업단지와 측정지점의 체계적인 선정 방법

권혜옥¹ · 김영성² · 김상균³ · 홍지형³ · 최성득^{1,†}

¹울산과학기술대학교 도시환경공학부, ²한국외국어대학교 환경학과, ³국립환경과학원 대기공학연구과

Systematic Selection of Priority Industrial Complexes and Sampling Sites for the Monitoring of Hazardous Air Pollutants (HAPs)

Hye-Ok Kwon¹, Young Sung Ghim², Sang-Kyun Kim³,
Ji-Hyung Hong³, and Sung-Deuk Choi^{1,†}

¹*School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST),
Ulsan 689-798, Korea*

²*Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies, Youngin 449-791, Korea*

³*Air Pollution Engineering Division, Climate and Air Quality Research Department,
National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea*

Received April 9, 2014/Revised May 9, 2014/Accepted May 26, 2014

Industrial complexes are considered as a major source of hazardous air pollutants (HAPs) which include volatile organic compounds (VOCs), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), and heavy metals, etc. Therefore, the comprehensive monitoring and management of HAPs in the industrial complexes are required. In this study, the basic information of the industrial complexes (e.g., location, area, emission of air pollutants, meteorological conditions, and population) was used as input data for a geographic information system (GIS) software. On the basis of these GIS data, we proposed a systematic method for determining priority industrial complexes for the monitoring of HAPs. We identified 28 priority industrial complexes and classified them into four groups from level 1, whose HAPs should be continuously monitored, to level 4, whose HAPs do not have to be monitored. Furthermore, the case study of Ulsan was presented to demonstrate the selection procedure for sampling sites. The results of this study can be practically used to establish a long-term plan of the monitoring and management of HAPs.

Key words: Hazardous air pollutants, Priority industrial complexes, Sampling sites, Monitoring

1. 서 론

대기환경보전법에서는 유해대기오염물질(Hazardous Air Pollutants: HAPs)을 특정대기유해물질이라는 용어로 지칭하며, “사람의 건강과 재산이나 동식물의 생육에 직접 또는 간접으로 위해를 끼칠 우려가 있는 대기오염물질로서 환경부령으로 정하는 것”으로 규정한다.¹⁾

유해대기오염물질의 범주에는 일반적으로 독성이 강하다고 알려진 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds: VOCs), 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: PAHs), 폴리염화비페닐(Polychlorinated Biphenyls: PCBs), 다이옥신류(Polychlorinated Dibenzo-*p*-Dioxins and Furans: PCDD/Fs), 중금속 등이 포함된다. 이러한 물질들은 대부분 대기 중

[†]To whom correspondence should be addressed.

으로 배출되기 때문에 지속적인 대기 모니터링과 저감 방안 모색이 중요하다. 이러한 이유로 국내에서는 35종의 특정대기유해물질이 지정되었으며, 전국적으로 분포한 대기중금속측정망, 잔류성유기오염물질측정망, 유해대기물질측정망에서 상시 모니터링이 진행되고 있다.

환경부는 2006년 『대기환경개선 10개년 종합계획』을 수립하여, 5대 광역시, 인구 50만 이상의 중소도시, 광양만권 등 주요 산업단지의 대기환경개선 대책을 추진하고 있다. 또한, 국립환경과학원은 2010년 화학물질 배출량 조사를 통해 산업시설 배출량 중 99%가 대기로 배출되고 있으며, 전체 화학물질 배출량의 70% 이상이 산업단지에서 배출된다고 보고하였다.²⁾ 이처럼 산업단지는 다양한 화학물질을 대량으로 사용하고 대기로 배출하므로, HAPs의 주요 배출원으로 간주되지만, 배출량과 대기농도의 시공간적 변화가 크므로 즉각적인 관리와 대응이 어렵다. 국내 산업단지를 대상으로 수행된 대기오염 연구들을 살펴보면, 시공간적 농도수준 조사³⁻⁹⁾, 인근 지역으로의 영향 파악,^{10,11)} 대기 모델링을 통한 오염원 추정,^{12, 13)} 주거단지의 이격거리 설정¹⁴⁾ 등 다양한 주제로 연구들이 진행되었다.

한편, 국립환경과학원은 산업단지의 HAPs 농도수준과 주변 지역에 대한 영향을 확인하기 위해, 2000년대 중반부터 대형 국가산업단지 위주로 계절별 집중 모니터링 사업을 수행하고 있다. 2005~2007년 시화·반월,^{15,16)} 2008~2009년 여수·광양,¹⁷⁾ 2009년 울산,¹⁸⁾ 2010년 구미·대구,¹⁹⁾ 2011년 대산,²⁰⁾ 2012년 광양만권, 청주, 포항에서 연구가 수행되었으며, 2014년에는 거제 옥포지역을 대상으로 연구가 수행될 예정이다. 이러한 산업단지 모니터링 사업을 통해, 국내에서는 가장 많은 항목의 HAPs가 분석되었고, 이를 기반으로 『국가 유해대기오염물질 기본계획 수립 및 배출특성사업 종합평가』가 수행되었다.²¹⁾ 기존 국가산업단지 모니터링 보고서들을 검토한 결과, 미국환경보호청(U.S Environmental protection agency: US EPA)과 대기오염공정시험방법에 제시된 분석법보다 철저한 정도 관리(QA/QC)가 이루어졌으므로 분석결과의 신뢰성이 매우 우수한 것으로 평가된다.

그러나 기존 연구들은 모니터링 대상 산업단지와 시료채취지점 선정에 대한 객관적이고 자세한 기준을 제시하지 않았으므로, 이들 선정방법을 표준화하여 후속 연구에 적용할 필요가 있다. 그러므로 본 연구에서는 산업단지 관련 기초 자료, 대기오염물질 배출량 자료, 지리정보시스템(Geographic Information System: GIS)

을 이용하여 산업단지와 시료채취지점 선정 표준화 방법을 제시하였다. 이를 통해 연구인력과 예산을 고려한 체계적인 HAPs 모니터링 계획을 수립하기 위한 기초를 마련하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 산업단지 선정 절차

본 연구에서 제안하는 우선순위 산업단지 선정절차는 다섯 단계로 구성된다(Fig. 1). 본 절에서는 개략적인 연구방법을 설명하고, 구체적인 선정절차는 3.1~3.2절에 제시하였다. 첫째, 한국산업단지공단 자료²²⁾와 국립환경과학원 화학물질배출이동량 정보시스템(Pollutant Release and Transfer Registers: PRTR)²³⁾을 활용하여, 산업단지 위치, 면적, 가동업체 수, 가동률, 주요 업종, 화학물질 대기 배출량 등 기초 자료를 수집하고 데이터베이스화하였다. 본 연구에서는 PRTR 자료를 사용하였으나, 필요한 경우에는 국립환경과학원 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System: CAPSS) 자료나 업체별/산업단지별 배출량 자료를 활용할 수 있다. 전국의 산업단지는 국가, 일반, 도시첨단, 농공단지로 분류되며, 이 중에서 국가산업단지는 총 41개이며 전체 산업단지 면적의 절반 이상을 차지한다. 산업단지 중에서 PRTR 배출량 자료가 있는 산업단지만을 모니터링 대상으로 고려하였으며, 농공산업단지는 HAPs 배출과는 큰 관련이 없으므로 자료조사와 모니터링 대상에서 제외하였다.

둘째, 조사 대상 산업단지 면적과 PRTR 대기 배출량 순위를 고려하여, 총 44개의 산업단지를 선정하였다. 본 연구에서는 산업단지 면적과 대기배출량만을 고려하였으나, 이외에도 단위면적당 배출량, 총배출량, 업체 수 등 다양한 인자들을 고려할 수 있다. 또한, 1차로 선정된 산업단지들에 대해 실제로 HAPs 모니터링이 필요한지 확인하는 과정이 필요하다.

셋째, 산업단지에 입주한 주요 업체들의 업종에 따라 사용 연료의 종류와 양이 다르며, 이에 따라 HAPs 배출항목과 배출량이 결정된다. 그러므로 산업단지별로 주요 업종을 고려하여 적절한 가중치를 적용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 산업단지 면적, 대기배출량, 연료 종류와 사용량을 고려한 가중치를 적용하였다. 1차로 선정된 44개 산업단지 중에서 가중치 적용 점수가 일정 수준 이상인 28개의 산업단지를 2차로 선정하였다.

넷째, 연구인력과 예산을 고려한 효율적인 모니터링

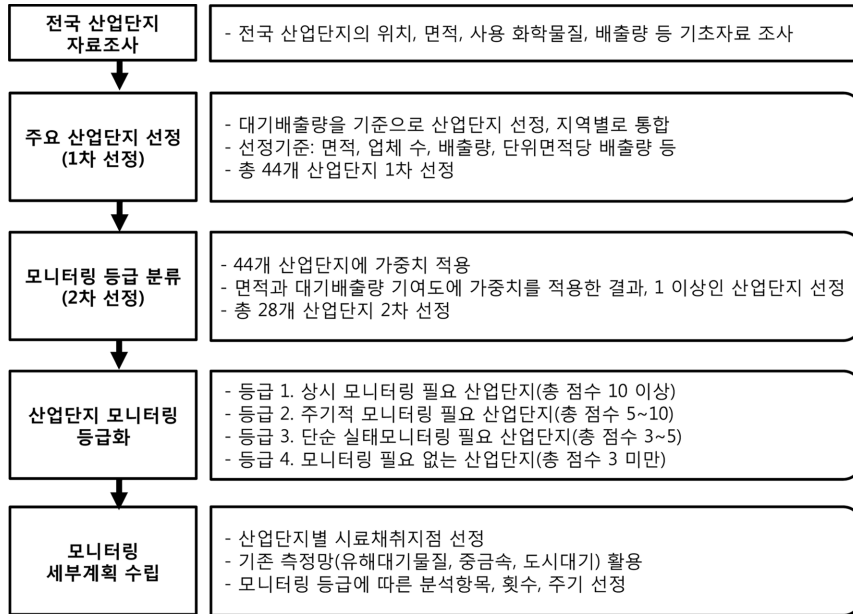


Fig. 1. Procedure for the selection of priority industrial complexes for the monitoring of HAPs.

계획 수립을 위해, 산업단지 모니터링 기준을 1등급(상시 모니터링 필요 산업단지), 2등급(주기적 모니터링이 필요한 산업단지), 3등급(단순실태 모니터링 필요 산업단지), 4등급(모니터링이 필요 없는 산업단지)으로 구분하였다.

다섯째, 개별 산업단지의 모니터링 등급과 주변 인구 밀도, 기상자료, 주거지역으로부터의 거리 등을 파악하여 산업단지별 세부 모니터링 계획을 수립하였다. 이때, 연속성이 있고 효율적인 모니터링을 위해 유해대기물질 측정망과 도시대기 측정망 등 기존 측정망을 활용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 울산지역에서의 시료채취지점 선정절차를 시범사례로 제시하였다.

2.2. 시료채취지점 선정 절차

기존 국가산업단지 모니터링 결과를 바탕으로, 산업단지별 시료채취지점 선정 절차를 Fig. 2에 나타내었다. 시료채취지점 선정에서 우선하여 고려할 내용은 공단, 주거, 상업, 청정 등의 지역구분 방법이다. 기존 국가산업단지 모니터링 보고서를 검토한 결과, 청정지역으로 구분된 시료채취지점이 산업단지와 매우 가깝거나 산업단지로부터 풍하 지역에 위치하므로 계절풍에 의해 산업단지의 영향을 직접적인 받는 경우가 있었다. 그러므로 세부행정구역별 인구밀도, 토지이용, 공장 개수 등의 지리정보를 이용하여 주거/청정지역 시료채취지점과 산업

단지와의 거리기준을 설정할 필요가 있으며, 계절별 주풍향에 따른 산업단지의 영향을 고려하여 시료채취지점을 선정해야 한다. 또한, PRTR 자료를 활용하여 해당 산업단지 내 주요 배출원을 파악해야 하며, 연구지역이 복잡한 지형이거나 배출원이 산재한 경우에는 대기확산 모델을 이용하여 적절한 시료채취지점을 선정할 수 있다. 시료채취지점 선정 시, 해당지역에 도시대기 측정망이 설치되어 있다면 대기환경기준물질(SO₂, NO₂, O₃, CO, PM₁₀)의 지리적 분포와 계절 변화를 살펴볼 필요가 있다. 이를 토대로 산업단지를 포함한 배출원이 주변지역 대기오염에 미치는 영향을 파악하기 수월하기 때문이다.²⁴⁾ 특히, HAPs의 경우, 지역 내 유해대기물질 측정망과 대기중금속 측정망 분석결과를 반영하여 시료채취지점을 선정할 필요가 있다.

공업지역 시료채취지점의 경우, PRTR 자료를 이용하여 산업단지 입주업체의 배출량 현황을 조사한 후 GIS에 입력하고, VOCs와 중금속 배출량이 많은 업체 밀집 지역을 모니터링 지점으로 선정하였다(국가산업단지 모니터링 사업의 측정분석 대상물질은 PAHs, VOCs, 중금속 위주이지만, PRTR 자료에는 나프탈렌을 제외한 PAHs 배출량이 누락됨). 이때, 업종별로 VOCs 배출량이 많은 곳과 중금속 배출량이 많은 곳이 다를 수 있으므로 이를 고려하여 지점을 선정하였다.

산업단지 HAPs 모니터링의 궁극적인 목적은 산업단

3. 결과 및 고찰

3.1. 우선순위 산업단지 선정

국가, 일반, 도시첨단 산업단지 중에서 화학물질(PRTR 1그룹, 2그룹, 유독물, 관찰물질, 발암물질) 대기배출량 상위 200개 산업단지를 선정하였다. 원활한 관리와 효율적인 모니터링을 고려하여, 동일 행정구역 내에 있는 산업단지들을 지역별로 통합하여 69개로 축약하였다. 즉, 두 개 이상의 산업단지가 동일한 행정구역 내에 위치한 경우에는 하나의 산업단지로 취급하였다. 예를 들어, 울산미포국가산업단지와 온산국가산업단지는 모두 울산에 위치하므로 하나의 산업단지(울산산업단지)로 취급하였다. 이처럼 분류된 69개 산업단지의 PRTR 대기배출량을 계산하였으며, 각각 전체 배출량의 0.1% 이하를 차지하는 산업단지 25개를 제외한 44개 산업단지를 모니터링 대상으로 선정하였다(Fig. 3).

우선순위 모니터링 대상 산업단지를 선정하기 위하여, Fig. 3에 나타낸 44개 개별 산업단지의 대기배출량 기여율(%)과 면적 기여율(%)을 계산하고 이를 합산하였다(Table 1). 이를 통해 대기배출량이 많고 규모가 큰 산업단지의 순위를 정하였다. 그러나 이러한 방법을 사용할 경우, 면적은 좁지만 배출량이 많은 소형 산업단지가 모니터링 대상에서 누락될 수 있으므로, 소형 산업단지에 대해서는 단위면적당 배출량을 고려할 필요가 있다. 한편, PRTR에서 제공하는 산업단지별 배출량 자료는 다양한 화학물질을 모두 포함한 총 배출량이므로 HAPs 모니터링의 우선순위 선정에 직접 적용하는 데 한계가 있다.

3.2. 산업단지 모니터링 등급 선정

앞서 언급한 자료(Table 1)의 한계를 보완하고자, PAHs와 VOCs가 모두 배출될 수 있는 석유화학 산업단지부터 배출이 상대적으로 적은 제조업까지 주요 업종별 가중치를 차등 적용하였다. 특히, PAHs와 같이 화석 연료의 불완전 연소로 배출되는 HAPs 배출을 고려하기 위해, 통계청 산업조사 보고서²⁵⁾에 제시된 산업 중분류별 연료(석유, 가스, 석탄) 사용량 자료를 활용하였다. 업종별(석유화학, 철강, 기계, 전기전자, 전자통신, 기타 제조업) 연료 사용량을 단순 비교할 경우, 석유화학/철강업이 다른 업종에 비해 10배 이상 많은 연료를 사용하고 있었다. 그러나 기존 국립환경과학원 산업단지별 평균 PAHs 농도 차이는 6배 이하였다. 따라서 본 연구에서는 연료 사용량이 가장 많은 석유화학업종과 연료 사

용량이 가장 적은 기타 제조업의 가중치 차이를 6배(석유화학 3.0, 철강 2.0, 기계 0.9, 전기전자 0.8, 전자통신 0.7, 기타 제조업 0.5)로 설정하였다. 44개 산업단지의 배출량 비율과 면적 비율의 합에 가중치를 곱하여 최종 점수를 산정하였으며, 총합이 1 이상인 27개 산업단지와 대산산업단지를 모니터링 등급 분류를 위한 주요 산업단지(총 28개)로 선정하였다(Table 2).

총점 10 이상인 5개 산업단지(울산, 여수·광양, 시화·반월, 구미·대구, 포항)와 대산산업단지를 1등급 상시 모니터링이 필요한 산업단지(측정망 지원 개념)로 분류하였다. 대산산업단지는 2000년대에 들어서 본격적으로 조성되고 있는 산업단지로서 가장 높은 점수를 받은 울산산업단지와 같이 대규모 석유화학단지가 들어서는 중이다. 그러므로 산업단지 조성 초기부터 HAPs 모니터링을 수행할 경우, 새롭게 조성되거나 규모가 확장될 예정인 산업단지의 HAPs 관리를 위한 좋은 사례가 될 수 있을 것이다. 한편, PRTR에 등록된 대산산업단지 배출량 항목 대부분은 특정대기유해물질에 포함되지 않는다. 이러한 이유로 대산산업단지는 낮은 등급으로 분류될 수밖에 없다. 그러나 앞서 서술한 바와 같은 특수성을 고려하여 대산산업단지를 1등급 산업단지에 포함했다. 총점이 5~10점인 경우, 2등급으로 분류하였으며, 총 6개 산업단지가 포함되었다. 총점이 3~5인 경우, 3등급으로 분류하였으며, 그 이하를 4등급으로 분류하였다.

각 산업단지 등급의 특징은 다음과 같다: (1) 1등급 산업단지는 상시 모니터링이 필요한 산업단지로서, 유해대기물질측정망의 자료를 지원하는 개념이다. 모니터링을 통해 얻은 집중측정결과를 이용하여 유해대기물질측정망의 결과를 해석하는 데 사용할 뿐만 아니라, 측정소의 위치와 항목 등을 조정하기 위한 자료로 사용할 수 있다. (2) 2등급 산업단지는 측정망 측정의 타당성을 검토하기 위하여 모니터링이 필요한 산업단지이다. 1등급 산업단지와 유사하지만 시료채취지점 개수, 주기, 항목 등을 축소할 수 있다. 이러한 모니터링을 통해 상시 모니터링이 필요하다고 인정되면 측정망 설치를 추진할 수 있다. (3) 3등급 산업단지는 단순 실태 모니터링이 필요한 산업단지로서, 1, 2등급 모니터링 결과와 인근 유해대기물질측정망 결과를 해석하거나 보완하기 위한 산업단지로서, 민원발생과 화학물질 사고 발생 시 일부 시료채취지점을 선택하여 모니터링을 수행할 필요가 있는 산업단지이다. (4) 4등급 산업단지는 HAPs 배출량과 면적이 매우 작아서 별도 모니터링이 필요 없는 산업단지로서

Table 1. List of industrial complexes for the monitoring of HAPs with emission and area data

Order	Complex name	Emission (kg/yr)	Contribution (A)	Area (1,000 m ²)	Contribution (B)	Score (A+B)
1	울산*	8,840,265	27.9	51,011	17.7	45.6
2	여수·광양*	665,305	2.1	50,792	17.6	19.7
3	시화·반월산단*	1,150,903	3.6	32,241	11.2	14.8
4	영암삼호산단*	2,258,701	7.1	9,855	3.4	10.5
5	군장국가산단*	879,679	2.8	17,696	6.1	8.9
6	창원산단*	806,971	2.5	17,472	6.1	8.6
7	옥포국가산단	2,280,430	7.2	3,580	1.2	8.4
8	명지,녹산산단*	1,292,524	4.1	9,042	3.1	7.2
9	남동산단*	1,129,259	3.6	10,034	3.5	7.0
10	오창외국인투자지역	2,139,899	6.7	806	0.3	7.0
11	죽도국가산단	1,829,441	5.8	2,758	1.0	6.7
12	포항산단*	127,752	0.4	14,182	4.9	5.3
13	진해산단*	1,278,041	4.0	2,143	0.7	4.8
14	구미·대구*	421,957	1.3	9,780	3.4	4.7
15	안정국가산단	1,150,903	3.6	2,962	1.0	4.7
16	하남일반산단*	490,450	1.5	6,857	2.4	3.9
17	청주일반산단	916,185	2.9	3,027	1.0	3.9
18	사천일반산단*	619,791	2.0	2,816	1.0	2.9
19	대전일반산단*	196,355	0.6	5,877	2.0	2.7
20	안성일반산단*	517,293	1.6	1,574	0.5	2.2
21	익산산단*	103,539	0.3	5,219	1.8	2.1
22	완주일반산단*	171,315	0.5	4,458	1.5	2.1
23	평택일반산단*	356,229	1.1	2,572	0.9	2.0
24	파주LCD일반산단*	329,247	1.0	1,876	0.7	1.7
25	화성일반산단*	129,982	0.4	3,201	1.1	1.5
26	천안산단*	87,601	0.3	3,004	1.0	1.3
27	양산일반산단	237,638	0.7	1,271	0.4	1.2
28	증평일반산단	227,036	0.7	507	0.2	0.9
29	함안칠서일반산단	45,514	0.1	1,866	0.6	0.8
30	대산산단*	73,616	0.2	1,541	0.5	0.8
31	경산1일반산단	124,853	0.4	1,150	0.4	0.8
32	전주제2일반산단	204,585	0.6	531	0.2	0.8
33	칠곡왜관일반산단	24,670	0.1	1,675	0.6	0.7
34	음성금왕일반산단	69,218	0.2	783	0.3	0.5
35	영주일반산단	149,257	0.5	130	0.0	0.5
36	충주증원일반산단	21,049	0.1	1,059	0.4	0.4
37	청원부용일반산단	28,663	0.1	810	0.3	0.4
38	연기조치원일반산단	43,490	0.1	708	0.2	0.4
39	고령다산일반산단	64,273	0.2	447	0.2	0.4
40	마산진북일반산단	29,262	0.1	468	0.2	0.3
41	고성내산일반산단	79,400	0.3	262	0.1	0.3
42	진천이월일반산단	62,578	0.2	180	0.1	0.3
43	논산일반산단	34,522	0.1	165	0.1	0.2
44	경주의동1지방산단	29,628	0.1	116	0.0	0.1
Total		31,719,269	100	288,504	100	200

*두 개 이상의 산업단지를 하나로 통합

서, 유해대기물질측정망과의 연계성이 없는 산업단지를 의미한다.

본 연구에서 제시한 모니터링 등급은 절대적인 개념이 아니므로 대산지역과 같이 최근에 형성된 산업단지

Table 2. Monitoring levels of industrial complexes according to the weighted scores

Order	Complex name	Score (A+B)*	Weighted value (C)	Final score (A+B)×C	Classification
1	울산산단	45.55	3.0	136.65	Level 1
2	여수·광양산단	19.70	3.0	59.11	
3	시화·반월산단	14.80	3.0	44.41	
4	구미·대구산단	4.72	3.0	14.16	
5	포항산단	5.32	2.0	10.64	
6	대산산단**	0.77	3.0	2.30	
7	영암삼호산단	10.54	0.9	9.48	Level 2
8	옥포국가산단	8.43	0.9	7.59	
9	창원산단	8.60	0.8	6.88	
10	안성일반산단	2.18	3.0	6.53	
11	명지·녹산산단	7.21	0.9	6.49	
12	죽도국가산단	6.72	0.9	6.05	
13	오창외국인투자지역	7.03	0.7	4.92	Level 3
14	군장국가산단	8.91	0.5	4.45	
15	진해산단	4.77	0.9	4.29	
16	안정국가산단	4.66	0.9	4.19	
17	청주일반산단	3.94	0.9	3.54	
18	남동산단	7.04	0.5	3.52	
19	하남일반산단	3.92	0.5	1.96	Level 4
20	익산산단	2.14	0.9	1.92	
21	완주일반산단	2.09	0.9	1.88	
22	대전일반산단	2.66	0.7	1.86	
23	평택일반산단	2.01	0.8	1.61	
24	사천일반산단	2.93	0.5	1.47	
25	화성일반산단	1.52	0.8	1.22	
26	파주LCD일반산단	1.69	0.7	1.18	
27	천안산단	1.32	0.5	0.66	
28	양산일반산단	1.19	0.5	0.59	

*Table 1 자료, **대산산업단지는 특수성을 고려하여 최종점수와 무관하게 Level 1에 포함

의 경우에는 등급 내에 포함되지 않았더라도, 자료확보를 위해 모니터링 대상 산업단지에 추가하여 조사할 수 있는 유연한 관리체계가 필요하다.

3.3. 산업단지 선정결과의 적합성

국립환경과학원에서 모니터링 대상으로 선정하여 연구를 수행했거나 수행 예정인 시화·반월, 여수·광양, 울산, 구미·대구, 대산, 광양만권, 청주, 포항, 거제 옥포산업단지는 본 연구에서 제안한 우선순위 산업단지 3등급 이내에 포함되었다(Table 2). 그러므로 지금까지 비교적 합리적으로 모니터링 대상 산업단지를 선택하여 연구과제를 진행해 온 것으로 평가할 수 있다.

PRTR에 제시된 지역별 주요 대기오염물질 배출량 분포와 우선순위 모니터링 대상 산업단지의 위치를 비교하여(Fig. 4), 모니터링 대상에서 누락된 지역이 있는지

파악하였다. 지역별 대기배출량이 많지만 모니터링 산업단지 선정에서 제외된 지역은 평택(평택송탄산단산업단지 외 4개 산업단지, 주요업종: 기계와 화학), 청주(청주일반산업단지, 주요업종: 기계 등), 군산(군장국가산업단지 외 2개, 주요업종: 철강과 화학 등) 등이 있다. 앞으로 이들 지역에 대한 모니터링 필요성을 검토할 필요가 있으며, 이미 청주산업단지에 대해서는 2012년에 모니터링을 수행하였다.

3.4. 시료채취지점 선정 사례: 울산산업단지

본 절에서는 울산산업단지를 시범사례로 선택하고 2.2 절에서 제시한 절차(Fig. 2)와 기준에 따라 시료채취지점을 선정하였다. 울산지역의 기초자료(행정구역별 인구, 화학물질 배출량, 계절별 풍향풍속 자료)를 데이터베이스화한 후, GIS에 입력하여 이들 자료를 시각화하고 단

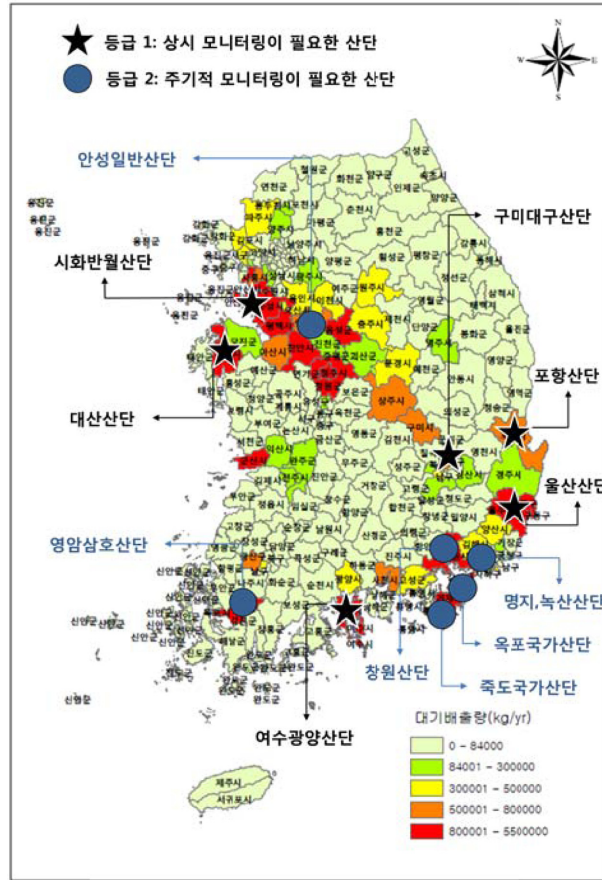


Fig. 4. Locations of the level 1 and 2 industrial complexes on the base map of PRTR emissions to the atmosphere in South Korea.

계적으로 시료채취지점을 선정하였다(Fig. 5).

첫 번째 단계에서는 VOCs를 주로 배출하는 업체가 밀집한 지점들을 선정했으며(울산미포국가산업단지 두 개 지점, 온산국가산업단지 한 개 지점), 두 번째 단계에서는 중금속을 다량으로 배출하는 업체가 많은 한 개 지점(온산국가산업단지)을 선정하였다. 첫 번째와 두 번째 단계에서는 배출량이 많은 업체 주변의 기존 도시 대기측정소(부곡동, 화산리)를 선정했으며, 기존 측정소가 배출량이 많은 업체 인근에 있지 않으면 신규 시료 채취지점(울산미포국가산업단지 현대중공업 부근)을 추가하였다. 세 번째 단계에서는 주거지역 시료채취지점을 선정하였다. 울산의 경우, 기존 도시대기측정소들이 본 연구에서 제시한 조건(산업단지 인근, 높은 인구밀도, 주풍향에 따른 산업단지 영향)을 만족하는 위치에 있으므로, 기존 측정망에 포함된 지점 중에서 각각 산업단지의 서편과 동편에 위치한 두 측정소(대송동, 삼

산동)를 시료채취 지점으로 선정하였다. 마지막으로 대조지점은 산업단지와 비교적 멀리(10 km 이상) 떨어진 지점으로서, 인구밀도가 평균 이하인 주거지점(범서읍)을 선택하였다.

3.5. 우선순위 산업단지 선정방법 개선사항

본 연구에 사용된 전국 산업단지별 배출량 자료는 HAPs를 포함한 전체 화학물질 대기배출량 자료로서, PRTR 홈페이지에 공개된 해당 산업단지 자료를 이용하여 모니터링 우선순위를 도출하였다. 따라서 HAPs로 지정되지 않은 물질(암모니아, 각종 산 등)의 배출량에 의해 순위가 변경될 가능성이 있다. 그러므로 향후 산업단지별 PRTR 대기배출 총량이 아닌 HAPs 배출량으로 우선순위를 산정할 필요가 있다.

PAHs의 경우, 나프탈렌을 제외하면 PRTR에 제시된 자료가 거의 없으므로 본 연구에서는 업종별 연료사용

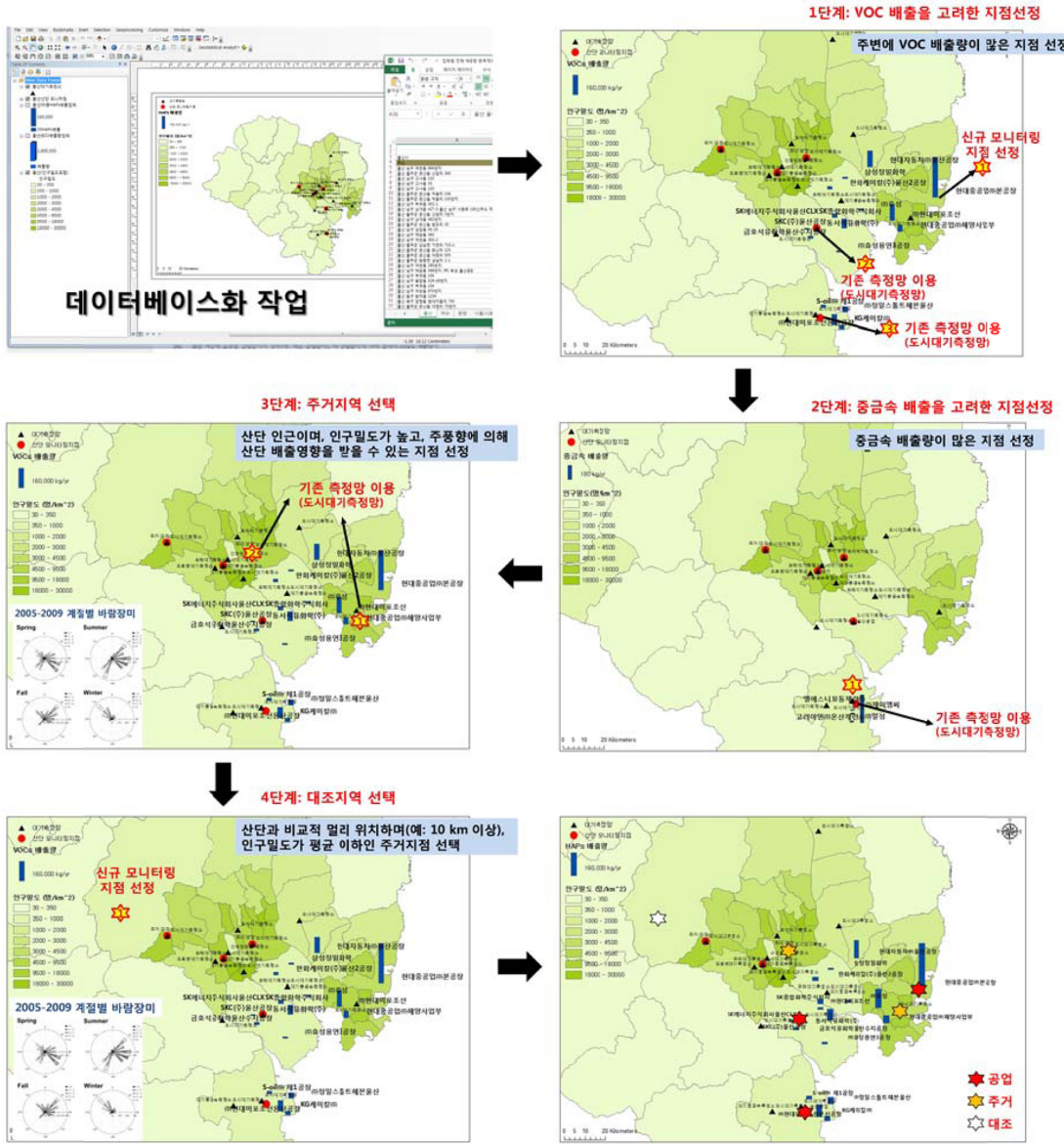


Fig. 5. Procedure for the selection of sampling sites in Ulsan for the monitoring of HAPs.

량 등을 근거로 가중치를 부여하였다. 그러나 더욱 정확하게 PAHs 배출량을 추정할 수 있는 가중치 계산방법을 개발하여, 산업단지 모니터링 등급화 점수의 신뢰성을 향상할 필요가 있다.

최근에 조성된 산업단지의 경우, 타 산업단지보다 HAPs 배출량이 적어서 본 연구의 우선순위 모니터링 산업단지에 포함되지 않았을 가능성이 있다. 그러므로 대산지역과 같이 최근에 조성된 산업단지의 경우, 지역적 특수성과 주요 업종(석유화학계열 등 HAPs 배출이

우려되는 산업 등)을 고려하여 우선순위 모니터링 대상 산업단지로 추가할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 전국 산업단지에 대한 기초현황을 조사한 후, PRTR 대기배출량 자료가 있는 산업단지를 모니터링 대상으로 선택하였다. 동일한 행정구역 내에 위치한 산업단지는 모니터링의 용이성을 위해 하나의

산업단지로 취급하였고 이렇게 분류된 산업단지에 업종별 가중치를 부여하여 순위에 따라 모니터링 등급을 부여하였다. 최종적으로 1등급(측정망 상시 측정을 지원하기 위하여 모니터링이 필요한 산업단지) 6개, 2등급(측정망 측정의 타당성을 검토하기 위하여 모니터링이 필요한 산업단지) 6개, 3등급(단순 실태파악을 위해 모니터링이 필요한 산업단지) 6개, 4등급(모니터링이 필요 없는 산업단지) 10개를 선정하였다. 지역별 대기오염물질 배출량 자료와 본 연구에서 선정한 모니터링 대상 산업단지의 위치를 비교한 결과, 지역별 배출특성을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 배출량이 많음에도 불구하고 선정에서 누락된 일부 지역에 대해서는 연구비 규모와 인력을 고려하여 모니터링 대상으로 추가할 수 있다. 또한, 시료채취지점(공업지역, 주거지역, 대조지역, 기존 측정망과의 연계) 선정을 위해 고려할 사항들을 제안하였으며, 시료채취지점 선정절차에 따라 울산산업단지의 시료채취지점 선정 사례를 제시하였다.

본 연구결과는 향후 HAPs 모니터링 대상 산업단지와 측정지점을 선정하는데 매우 실용적으로 사용될 수 있을 것이다. 특히, 국가차원의 중장기 HAPs 모니터링 계획을 수립하는데 필수 자료로 활용될 것으로 기대된다. 향후, 본 연구에서 제시한 연구방법을 보다 체계화하고 적절한 입력자료를 사용하여 신뢰성을 향상시킨다면, 궁극적으로 대기질 개선에 도움이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2013년 국립환경과학원 “HOT SPOT 유해대기오염물질 모니터링 로드맵 마련 연구”의 일환으로 수행되었습니다. GIS 입력자료 수집에 도움을 준 UNIST 대학원생들과 학부연구참여생들에게 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

1. 법제처, “대기환경보전법(제1장 제2조)”, 2014.
2. 환경부, “2011년도 화학물질 배출량 조사결과 보고서”, 2013.
3. 구민호, “구미산업단지 대기중 카르보닐화합물의 농도 특성”, 2005, 금오공과대학교 석사학위논문.
4. 김민정, “공단 특성에 따른 대기오염물질의 분포 특성에 관한 연구”, 2010, 한양대학교 석사학위논문.
5. 박비오, 박미영, 박성순, 양고수, “전북지역 산업단지[전주, 완주]의 VOCs 및 악취물질 대기환경 모니터링”, *한국환경과학회지*, 2004, 3, 127-134.
6. 안상영, “산업단지 악취관리를 위한 대기관리시스템 기반 조성 및 대책방안에 관한 연구”, 2005, 계명대학교 박사학위논문.
7. 안상영, 최성우, “대구성서산업단지 발생원부지경계 대기중 휘발성유기화합물질의 농도수준”, *한국환경과학회지*, 2005, 14, 53-60.
8. 전병연, “대기오염물질 배출허용기준 강화에 따른 광양만권 대기질 특성 연구”, 2013, 전남대학교 석사학위논문.
9. 최우건, 배상호, 박덕신, 정영구, 김태오, “구미산업단지 대기중 휘발성유기화합물(VOCs)의 농도특성”, *한국환경과학회지*, 2004, 13, 205-214.
10. 강병욱, 정만호, 전준민, 이학성, “광양산업단지 인근지역 대기 중 미세먼지와 산성오염물질 특성”, *한국대기환경학회지*, 2011, 27, 16-29.
11. 김모근, 신승호, 조환근, “산업 도시의 산업단지 부지와 주거 지역의 대기 중 호흡성 분진과 구성 미량 원소의 특성”, *환경독성보건학회지*, 2010, 25, 27-40.
12. 김태오, 최우건, 김민균, 황인조, “수용모델(PMF)로 추정된 구미산업단지 VOCs 오염원 및 기여도”, *한국환경학회 추계학술대회 논문집*, 2009, 63-67.
13. 심영지, “산업단지 대기 중 다이옥신류 프로파일 특성과 다환방향족탄화수소 발생원 정의 및 CMB모델 적용평가”, 2010, 부경대학교 석사학위논문.
14. 정상진, “AUSPLUME 모델을 이용한 악취를 피하기 위한 산업오염원과 주거단지 사이 이격거리에 관한 연구”, *한국대기환경학회지*, 2002, 18, 393-400.
15. 국립환경과학원, “시화·반월지역 유해대기오염물질 조사 연구”, 2006.
16. 국립환경과학원, “시화·반월지역 유해대기오염물질 조사 연구”, 2007.
17. 국립환경과학원, “여수·광양지역 유해대기오염물질 조사 연구”, 2009.
18. 국립환경과학원, “울산지역 유해대기오염물질 조사연구”, 2010.
19. 국립환경과학원, “구미·대구지역 유해대기오염물질 조사 연구”, 2011.
20. 국립환경과학원, “대산지역 유해대기오염물질 조사 연구”, 2012.
21. 국립환경과학원, “국가유해대기오염물질 기본계획 수립 및 배출특성사업 종합평가”, 2011.
22. 한국산업단지공단, <http://www.kicox.or.kr>, 2014년 4월.
23. 국립환경과학원 화학물질배출·이동량 정보시스템, <http://ncis.nier.go.kr/triopen>, 2014년 4월.
24. 정근식, 권혜옥, 이윤세, 정세미, 오정은, 최성득, “대도시의 다환방향족탄화수소 대기오염특성 규명을 위한 예비연구”, *한국환경분석학회지*, 2013, 16, 239-249.
25. 통계청, “산업총조사보고서”, 2004.